فصل اول

«مواد منفجره و تئوری انفجار»

مقدمه

هدف نهایی در عملیات آتشکاری این است که انرژی شیمیایی ذخیره شده در مواد منفجره به شیوه کنترل‌شده‌ای آزاد شده و موجب خردشدگی و شکستن سنگ گردد.

انفجار (Berthhole): به انبساط ناگهانی گازها به حجمی بسیار بیشتر از حجم اولیه، انفجار گفته می‌شود که همراه با صدا و تأثیرات مکانیکی شدید است و در آن از مواد منفجره برای رسیدن به این هدف استفاده می‌شود.

مواد منفجره (Explosive): ترکیب شیمیایی یا مخلوطی مکانیکی است که در اثر جرقه، ضربه، حرارت یا شعله در مدت زمان کوتاهی تجزیه شده و مقدار بسیار زیادی گاز و حرارت تولید می‌کند و به سه نوع هسته‌ای، شیمیایی و مکانیکی تقسیم‌بندی می‌شوند.

مواد منفجره هسته‌ای: می‌توانند تا ۴×۱۰^{۱۴} کیلوگرم متر به ازای هر کیلوگرم مواد، نیرو تولید کنند که در مقایسه با مواد منفجره شیمیایی مقدار بسیار زیادی است.

مواد منفجره مکانیکی: موادی خنثی هستند که تحت تأثیر حرارت، خیلی سریع تبخیر شده و فشار لازم را برای خردکردن و جابه‌جایی سنگ ایجاد می‌کنند مانند روش کاردکس (cordex).

مواد منفجره شیمیایی: به دو دسته اصلی تندسوز و کندسوز دسته‌بندی می‌شوند که در این بین تندسوزها خود از دو نوع اولیه و ثانویه تشکیل شده‌اند. تندسوزهای اولیه برای انفجار به تحریک کمتری نیاز داشته و حساس‌تر می‌باشند و بیشتر به‌عنوان محرک از آنها استفاده می‌شود در صورتی که تندسوزهای ثانویه حساسیت کمتر ولی قدرت و انرژی بیشتری داشته و برای انفجار نیاز به یک موج انفجار خواهند داشت. سرعت فعل و انفعالات در مواد منفجره شیمیایی تندسوز تا $۸۰۰۰ \frac{m}{s}$ و فشار ایجاد شده تا $۲۵۰۰۰۰ atm$ نیز می‌رسد.

مواد منفجره شیمیایی کندسوز، دارای فشار و سرعت انفجار کمتری نسبت به تندسوزها هستند و اغلب از ترکیبات نیترات آمونیوم می‌باشند. در حالت کلی مواد ملایم در فضای بسته، تندتر می‌سوزند ولی مواد تندسوز در هر دو شرایط یکسان خواهند سوخت.

نکته۱: واضح‌ترین اختلاف میان مواد منفجره تندسوز و کندسوز، سرعت آزادشدن انرژی است نه میزان آزادشدن انرژی.

تعریف دیگری از انفجار: تجزیه یا سریع سوختن مواد منفجره که منجر به آزادشدن بسیار سریع گاز و حرارت زیاد می‌گردد.

می‌توان گفت هر ماده سوختنی قابل انفجار است در صورتی که شرایط زیر فراهم گردد:

۱ـ اکسیژن به حد کافی وجود داشته باشد.

۲ـ امکان ترکیب سریع اکسیژن با ماده سوختنی فراهم گردد.

مثال ۱: کدام‌یک از گزینه‌های زیر نادرست است؟

۱) مواد منفجره شیمیایی در حالت کلی در هر فضایی با سرعت یکسانی می‌سوزند.

۲) مواد منفجره تندسوز دارای سرعت آزادشدن بیشتری نسبت به مواد منفجره کندسوز هستند.

۳) از مواد منفجره تندسوز اولیه بیشتر به عنوان محرک انفجار استفاده می‌شود.

۴) مواد منفجره تندسوز ثانویه برای انفجار نیاز به یک موج انفجار دارند.

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» در حالت کلی مواد منفجره کندسوز در فضای بستر با سرعت بیشتری نسبت به فضای باز خواهند سوخت، اما مواد منفجره تندسوز چه در فضای بسته و چه در فضای باز دارای سرعت سوختن یکسانی هستند.

ویژگی‌های مواد منفجره

در حالت کلی مواد منفجره با ویژگی‌هایی که دارند شناخته، ارزیابی و انتخاب می‌شوند که این ویژگی‌ها عبارتند از: حساسیت، سرعت انفجار، قدرت، قدرت خردکنندگی، وزن مخصوص، اثر رطوبت، پایداری، آتش‌گیری و سمیّت و فرّاریت.

۱ـ حساسیت: حداقل فاصله‌ای که لازم است تا یک وزنه ۲ کیلوگرمی بر روی ۰/۵ g ماده منفجره افتاده و از هر ده بار سقوط، یک بار آن را منفجر نماید. این حداقل فاصله، نماینده حساسیت آن ماده در مقابل ضربه می‌باشد. هر چه فاصله سقوط کمتر باشد، ماده حساس‌تر است.

حساسیت ماده منفجره به ساختمان مولکولی، اندازه کریستال‌ها، وزن مخصوص، رطوبت و درجه حرارت بستگی دارد. وزن مخصوص بالا، جذب رطوبت، افزایش ابعاد ذرات و پوشش کریستال‌ها سبب کم‌شدن حساسیت می‌گردد و افزایش دما باعث افزایش آن می‌شود.

آزمایش مواد منفجره در مقابل ضربه

نوع ماده منفجره	حداقل ارتفاع سقوط به سانتیمتر برای انفجار در رها شدن وزنه ۲ کیلوگرمی
فولمینات جیوه	۲
ازتور سرب	۳ – ۴
نیتروگلیسیرین (N.G)	۴
نیتروگلیکول	۱۱
دینامیت ۶۲٪ (۶۲٪ نیتروگلیسیرین)	۱۷
پانتریت PETN	۲۸
تتریل	۳۰
تری نیترو تلوئن TNT	۶۰ – ۷۰
آمونیت	۷۰ – ۷۵

الف) حساسیت در مقابل اصطکاک: حرارت ایجادشده توسط آن می‌تواند باعث تولید گرما شود که خود محرک انفجار است.

ب) حساسیت در مقابل حرارت: سبب تجزیه‌شدن ماده منفجره می‌شود و شدت تجزیه‌شدن تابع حرارت و درجه حرارت است. هر ماده منفجره دارای یک درجه حرارت بحرانی است که اگر حرارت از آن میزان فراتر رود، باعث ناپایداری و تجزیه ماده منفجره خواهد شد.

ج) حساسیت در مقابل چاشنی: این حساسیت تابع ابعاد ذرات، درجه حرارت، وزن مخصوص و شرایط فیزیکی ماده منفجره است. به طور مثال، هرچه ابعاد ذره کوچک‌تر شده و درجه حرارت محیط بالاتر رود، حساسیت در برابر چاشنی برای یک ماده منفجره خاص افزایش می‌یابد.

د) حساسیت در مقابل موج انفجار: اگر یک فشنگ ماده منفجره را در هوای آزاد منفجر کنیم، موج انفجار حاصل‌شده می‌تواند فشنگ دیگر را که به فاصله معینی از فشنگ اولیه قرار گرفته منفجر کند که این فاصله را فاصله انتقال انفجار می‌گویند. حساسیت در مقابل موج انفجار در فضای بسته، کمتر از فضای باز است.

نکته۲: برخی از مواد منفجره مثل آنفو و مواد منفجره ژله‌ای برای انفجار نیاز به موادی قوی‌تر از چاشنی معمولی دارند که این مواد **پرایمر** نامیده می‌شوند.

نکته۳: هر چه قطر فشنگ و وزن آن بیشتر باشد، فاصله انتقال انفجار بیشتر است که این نکته باید در تعیین فاصله‌داری (S) و انفجار در زیر آب مورد توجه قرار گیرد.

۲ـ سرعت انفجار: عبارت است از سرعت حرکت موج انفجار در ماده منفجره. بنابراین، پارامتری است که ریتم آزادشدن انرژی را نشان می‌دهد. اگر سرعت سوختن یک ماده منفجره بیش از سرعت صوت باشد آن را انفجار و چنانچه کمتر از سرعت صوت باشد آن را سوزش می‌نامند. هر چه سرعت انفجار بیشتر باشد، قدرت خردکنندگی بیشتر خواهد بود. سرعت انفجار با روش‌های مختلفی مانند روش داتریش، روش الکتریکی و... محاسبه می‌شود.

عوامل مؤثر در سرعت انفجار یک ماده منفجره به شرح زیر می‌باشند:

الف) وزن مخصوص: هر چه وزن مخصوص افزایش پیدا کند، سرعت انفجار و همچنین قدرت انفجار آن بیشتر خواهد شد.

ب) ابعاد ذرات: هر چه ابعاد ذرات مواد بیشتر باشد، سرعت انفجار بیشتر می‌شود.

ج) نوع چاشنی: سرعت انفجار با قدرت چاشنی رابطه مستقیم دارد.

د) قطر چال: با سرعت انفجار رابطه مستقیم دارد و بعضی از مواد مانند آنفو به تغییر قطر حساسیت بیشتری دارند.

نکته۴: افزودن آلومینیوم (Al) به ماده منفجره سبب کم‌شدن سرعت انفجار و افزایش قدرت آن می‌شود.

۳ـ قدرت انفجار: عوامل مؤثر در قدرت یک انفجار میزان و حرارت گاز آزادشده توسط انفجار است. یعنی هرچه حرارت و میزان گاز تولیدشده بیشتر باشد، قدرت ماده منفجره بیشتر است که از نظر کاربردی مهم‌ترین ویژگی ماده منفجره است.

مثال۲: چگالی ماده منفجره چه تأثیری بر روی قدرت، سرعت و حساسیت خواهد گذاشت؟

۱) کاهش چگالی باعث کاهش قدرت، افزایش سرعت و کاهش حساسیت می‌شود.

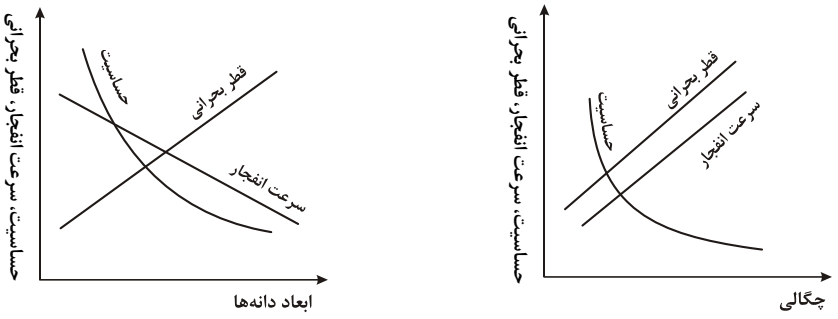
۲) افزایش چگالی باعث افزایش قدرت، کاهش سرعت و افزایش حساسیت می‌شود.

۳) کاهش چگالی باعث کاهش قدرت، کاهش سرعت و افزایش حساسیت می‌شود.

۴) افزایش چگالی باعث کاهش قدرت، افزایش سرعت و افزایش حساسیت می‌شود.

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» چگالی ماده‌ی منفجره، وزن واحد حجم ماده به‌کار رفته در ساختمان فشنگ آن است و برحسب $\frac{gr}{cc}$، $\frac{kg}{dm^3}$ و $\frac{ton}{m^3}$ بیان می‌شود. بنابراین هرچه چگالی ماده منفجره بیشتر شود، باعث افزایش قدرت انفجار می‌شود زیرا، میزان بیشتری گاز تولید شده و همچنین باعث افزایش سرعت انفجار می‌شود؛ زیرا فشردگی مواد بیشتر است و حرکت موج انفجار در ستون ماده منفجره سرعت بیشتری دارد. از طرفی هرچه چگالی افزایش یابد، حساسیت ماده منفجره کاهش می‌یابد و در مواقعی اگر این فشردگی و افزایش چگالی از یک حد مجاز بیشتر باشد، انفجار انجام نخواهد شد یا ناقص انجام خواهد شد.

۴ـ قطر بحرانی: مقدار قطر خرجی است که اگر مواد منفجره در کمتر از آن قطر قرار گیرند، منفجر نخواهند شد و این قطر برای خرج‌های متفاوت تغییر می‌کند. رابطه سرعت انفجار با قطر خرج در شکل زیر نشان داده شده است.



رابطه بین ویژگی‌های مواد منفجره

۵ـ قدرت خردکنندگی(Brisance): قابلیت ماده منفجره را برای شکستن سنگ نشان می‌دهد و به سرعت انفجار بستگی دارد. این قدرت ناشی از قدرت و سرعت فعل و انفعالات است و بدیهی است که تمرکز نیرو در زمان کمتر سبب خردشدگی بیشتر می‌گردد.

۶ـ چگالی (Density): چگالی اغلب مواد منفجره بین ۰/۸ تا ۱/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر است و مشابه سرعت انفجار در این مورد نیز با افزایش چگالی، خردشدگی بیشتری ایجاد می‌گردد.

نکته۵: چگالی ماده منفجره فاکتور مهمی در محاسبه میزان خرج لازم جهت آتشکاری است. در ته چال تمرکز انرژی بیشتری نیاز است و از مواد منفجره با چگالی بالا مانند مواد ژلاتینی و برای ستون ماده منفجره از موادی با چگالی پایین مانند آنفو استفاده می‌شود.

چگالی خرج‌گذاری: نسبت وزن مواد منفجره به حجم پرشده‌ی چال است که معمولاً از چگالی خرج، کمتر است. هرچه چگالی خرج‌گذاری بیشتر باشد، کیفیت انتقال انرژی از ماده منفجره به سنگ بیشتر خواهد بود.

۷ـ اثر رطوبت و مقاومت در برابر آب: دوام مواد منفجره یکی از خواصی است که حداکثر زمان انبارکردن ماده منفجره را بدون آنکه در آتشکاری تأثیری داشته باشد، بیان می‌کند.

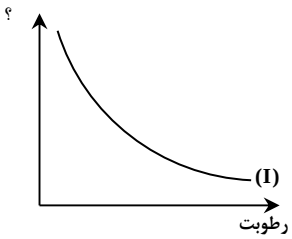
مقاومت در برابر آب: رطوبت بدترین نوع آلودگی مواد منفجره است که باعث مشکلات زیر می‌شود:

۱ـ پایین‌آمدن درجه حرارت انفجار

۲ـ تجزیه‌شدن ماده منفجره

۳ـ تأثیر گذاشتن بر روی پایداری، حساسیت و قدرت ماده منفجره

مثال۳: کدام گزینه معرف بهتری برای علامت سؤال مشخص‌شده در شکل زیر است؟



۱) سرعت انفجار
۲) حساسیت
۳) قدرت انفجار
۴) چگالی

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» هر چه رطوبت موجود در ماده منفجره داخل چال افزایش یابد، حساسیت آن برای انفجار کاهش پیدا خواهد کرد. از جمله مواد منفجره بسیار حساس به آب می‌توان آنفو را نام برد.

مثال۴: قدرت خردکنندگی، توانایی یک ماده منفجره را برای ..... نشان می‌دهد که با ..... رابطه مستقیم دارد.

۱) گسستن ـ نوع سنگ ۲) پودرکردن ـ نوع سنگ ۳) گسستن ـ چگالی ۴) پودرکردن ـ چگالی

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» قدرت خردکنندگی رابطه مستقیم با قدرت ماده منفجره و سرعت انفجار دارد و هر عاملی که باعث افزایش قدرت و سرعت انفجار (مانند چگالی) شود، می‌تواند قدرت خردکنندگی ماده منفجره را بهبود بخشد و از طرفی این پارامتر بیانگر قدرت ماده منفجره برای شکستن سنگ می‌باشد.

به منظور کار در محیط‌های آب‌دار اقدامات زیر صورت گرفته است:

۱ـ خود ماده منفجره در مقابل آب تغییر پیدا نمی‌کند.

۲ـ استفاده از پوشش پلاستیکی یا هر پوشش مناسب دیگری مانند پلی‌اتیلن‌ها

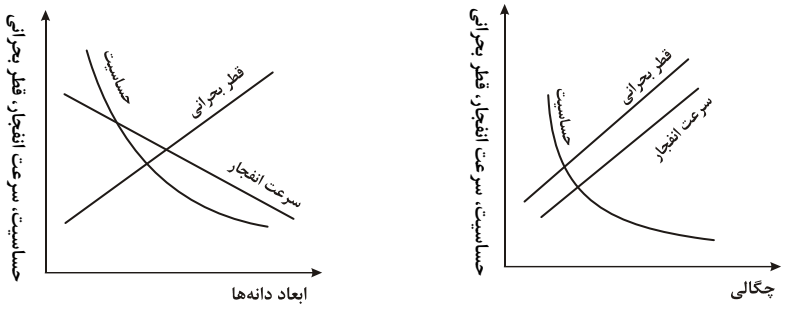
۳ـ آبکشی از چال با استفاده از پمپ‌های هوای فشرده یا برقی.

نکته۶: در صورت استفاده از پوشش‌ها و لوله‌های پلاستیکی عملاً بخشی از حجم چال از دست می‌رود.

۸ـ پایداری: این خاصیت حداکثر مدت زمانی است که یک ماده منفجره در معرض آب قرار می‌گیرد و خواص خود را از دست نمی‌دهد. این زمان برحسب ترکیب مواد منفجره متغیر بوده و بستگی به نیتروگلیسیرین (NG) یا افزودنی‌های خاص دیگر دارد. بر این اساس مواد منفجره ژلاتینی، دینامیت ژله‌ای و امولسیون‌ها کاملاً در برابر آب مقاوم هستند و نمک‌های اکسیدکننده مانند آلومینیوم نیترات موجود در آنفو، مقاومت در برابر آب را به شدت پایین می‌آورند چون ذاتاً جاذب آب هستند.

رابطه بین مشخصه‌های مواد منفجره

به طور کلی از دو ماده منفجره با قدرت مساوی آنکه سرعت انفجار بیشتری دارد، نیرو و قدرت خردکنندگی‌اش بیشتر دارد.



رابطه بین مشخصه‌های مواد منفجره

از شکل‌های بالا مشاهده می‌شود که با ازدیاد ابعاد دانه‌ها، حساسیت و سرعت انفجار کم می‌شود و به قطر بحرانی افزوده می‌گردد. اگر خرج در چال فشرده شود، سرعت انفجار آن بالا می‌رود، ولی حساسیت آن کاهش می‌یابد.

شیمی مواد منفجره

از نظر ترکیبات شیمیایی مواد منفجره به گروه‌های زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱ـ ترکیبات معدنی (Inorganic compounds) ۲ـ ترکیبات آلی (organic compounds) ۳ـ مخلوط مواد سوختنی و مواد اکسیدکننده

تعادل اکسیژن (oxygen Balance): اختلاف مقدار اکسیژن موجود در ماده منفجره و مقدار اکسیژن لازم برای تحقق کامل فعل و انفعالات است. اگر این اختلاف صفر باشد، یعنی تعادل اکسیژن برقرار یا میزان اکسیژن برای تمام فعل و انفعالات کافی است و اگر تعادل اکسیژن منفی باشد، یعنی فعل و انفعالات، اکسیژن کم می‌آورند و اگر تعادل اکسیژن مثبت باشد، یعنی در اثر انفجار اکسیژن آزاد می‌گردد یا اکسیدهای سمی ازت تولید می‌گردد.

نکته۷: بهترین ماده‌ی منفجره آن است که تعادل اکسیژن صفر داشته باشد تا هم از تولید CO به دلیل کم‌بودن اکسیژن جلوگیری شود و هم از تولید NO و NO_2 به دلیل اکسیژن اضافی جلوگیری گردد.

$O_\circ - 2C_\circ - \frac{1}{2}H_\circ = \circ$ صفر

$O_\circ - 2C_\circ - \frac{1}{2}H_\circ < \circ$ منفی

$O_\circ - 2C_\circ - \frac{1}{2}H_\circ > \circ$ مثبت

نکته۸: مواد منفجره‌ای مانند نیتروگلیسیرین (NG) دارای اکسیژن اضافی در ساختار خود می‌باشند و در برابر موادی مانند TNT و باروت دارای کمبود اکسیژن برای فعل و انفعالات کامل می‌باشند، لذا برای جبران کمبود اکسیژن در این موارد به آن‌ها نیتروگلیسیرین (NG) یا آمونیوم نیترات اضافه می‌کنند تا کمبود اکسیژن جبران گردد.

مثال۵: کدام‌یک از فعل و انفعالات زیر نشان‌دهنده ماده منفجره‌ای با تعادل اکسیژن صفر است؟

۱) $5NO_3NH_4 + CH_2 \rightarrow 11H_2O + CO_2 + 4H_2 + 2NO + 610\frac{cal}{g}$

۲) $6C_6H_2(NO)_2OH \rightarrow 8CO + 3CO_2 + 3H_2 + C + 3NO + 620\frac{cal}{g}$

۳) $2NO_3NH_4 + CH_2 \rightarrow 5H_2O + CO + 2NO + 820\frac{cal}{g}$

۴) $3NO_3NH_4 + CH_2 \rightarrow 7H_2O + CO_2 + 3N_2 + 900\frac{cal}{g}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» رابطه کلی برای تعادل اکسیژن مواد منفجره به صورت زیر نوشته می‌شود که در آن تأثیر عناصر جاذب اکسیژن دیگر مانند آلومینیوم و کلسیم که در ترکیبات مواد منفجره وجود دارند نیز مشاهده می‌شود. بنابراین:

$$eq = O_\circ - \frac{1}{2}H_\circ - 2C_\circ - \frac{1}{2}Na_\circ - Ca_\circ - \frac{3}{2}Al_\circ \Rightarrow eq = 3(2) - \frac{1}{2}(3\times 4 + 2) - 2(1) = \circ$$

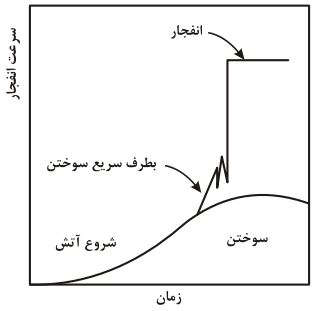
هم‌چنین در دیگر گزینه‌های موجود در مثال فرآورده‌های واکنش ترکیبات NO، NO_2 و CO که ناشی از تعادل اکسیژن مثبت و منفی هستند وجود دارد و تنها در فرآورده‌های واکنش چهارم است که چنین ترکیباتی دیده نمی‌شود.

ترموشیمی انفجار: این بحث مربوط به تغییرات انرژی داخلی است. انرژی ذخیره‌شده در یک ماده منفجره یک انرژی پتانسیلی و انرژی نهان یا استاتیکی است که این انرژی در حین فرآیند انفجار آزاد شده و به انرژی جنبشی و مکانیکی تبدیل می‌شود.

ثابت = انرژی جنبشی + انرژی پتانسیل

فرآیند انفجار

عمل انفجار شامل یک گسترش شیمیایی درون مواد منفجره با سرعت مافوق صوت و تبدیل آن به ترکیباتی است که متفاوت‌اند. خصوصیات اصلی این واکنش‌ها، شروع و ادامه فرآیند به وسیله یک موج ضربه مافوق صوت است که باعث برهم زدن پایداری مولکولی مواد می‌شود.



زمان مراحل مختلف انفجار از شروع تا تکمیل انفجار

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، یک موج اولیه واکنش را شروع می‌کند و فعل و انفعالات فوق، انرژی را ایجاد کرده و باعث شکستن سنگ می‌شود. این انرژی آزادشده به دو صورت خودنمایی می‌کند:

۱) انرژی موج ضربه یا فشار انفجار و ۲) انرژی ناشی از گازها یا فشار چال.

۱ـ انرژی موج ضربه (shockwave Energy): آن را انرژی ناشی از فشار انفجار (Detonation pressure) نیز می‌نامند که ناشی از انتشار موج انفجار در ستون ماده منفجره است. این فشار میراست و سرعت آن معادل سرعت انفجار ماده منفجره است. ایجاد شکاف‌های شعاعی و پوسته‌پوسته شدن، به وسیله موج ضربه صورت می‌گیرد. هم‌چنین قسمت اعظم انرژی مورد نیاز برای آزادکردن سنگ ارتباطی به موج ضربه ندارد. این مقدار برای مواد منفجره در حدود ۵ تا ۱۵% انرژی تئوریک آزادشده از انفجار ماده منفجره است. مقدار موج ضربه تابع چگالی، سرعت انفجار و اجزای تشکیل‌دهنده ماده منفجره است که به صورت تجربی به طور زیر نشان داده می‌شود:

$$P = ۴/۱۸\times۱۰^{-۷}\,\frac{D_e\cdot V_e^{۲}}{۱+۰/۸D_e} \qquad ۱\text{Kbar} = ۱۴۵۰۴\,\text{psi}$$

که در رابطه فوق:

$P =$ فشار موج ضربه برحسب Kbar ، $D_e =$ چگالی نسبی (وزن ماده منفجره به وزن آب هم حجم آن)، $V_e =$ سرعت انفجار برحسب $\frac{\text{ft}}{\text{s}}$

نکته۹: هر چه سنگ یکپارچه‌تر و سخت‌تر باشد، به ماده منفجره با فشار موج ضربه بیشتری نیاز است.

۲ـ انرژی ناشی از گازها یا فشار چال (Borehole pressure): به مقدار نیرویی که گاز تولیدشده از انفجار به دیواره چال وارد می‌کند، گفته می‌شود و بستگی به فشار و حرارت گاز ایجادشده دارد. هر چه حرارت زیادتر شود، فشار چال افزایش می‌یابد و در دمای ثابت هر چه مقدار گاز تولیدشده بیشتر باشد، فشار چال افزایش می‌یابد. این فشار تقریباً نصف فشار موج ضربه است. اما در مواد منفجره‌ای خاص مانند آنفو (ANFO)، میزان فشار چال تولیدشده بیشتر از فشار موج ضربه است. در حالت کلی در صورتی که از مواد منفجره در چال استفاده شود، پیشنهاد می‌شود که از موادی با فشار چال بیشتر استفاده شود.

نکته۱۰: در مواد منفجره قوی موج ضربه سریع‌تر از آزادشدن گاز عمل می‌کند و فشار آن از فشار گاز بیشتر است که این میزان بستگی به نوع ماده منفجره انتخابی و شرایط دیگر مانند شرایط توده سنگ دارد.

مثال۶: برای اینکه سرعت ماده منفجره‌ای دوبرابر شده و فشار انفجار حاصل از آن ثابت باقی بماند، چگالی آن می‌بایست چگونه تغییر کند؟

۱) $\frac{۱}{۴}$ برابر شود. ۲) ۴ برابر شود. ۳) $\frac{۱}{۲}$ برابر شود. ۴) ۲ برابر شود.

☑ **پاسخ:** گزینه «۱»

$$P \propto d\cdot v^{۲}$$

$$P' = d'\cdot(۲v)^{۲} \Rightarrow P' = P \Rightarrow dv^{۲} = ۴d'v^{۲} \Rightarrow \boxed{d' = \frac{۱}{۴}d}$$

انواع مواد منفجره

هدف از کاربرد مواد منفجره در معادن به‌کار گرفتن انرژی حاصل از انفجار برای شکستن سنگ است تا از توده اصلی سنگ جدا شده و به قطعات آماده حمل تبدیل گردد. برای استفاده از انرژی آزاد شده توسط انفجار، حفره‌هایی در سنگ ایجاد کرده و مواد منفجره را در داخل آنها حبس می‌کنند که به آنها **چال** (**Borehole**) می‌گویند.

برای تحقق یک انفجار این اجزا لازم می‌باشند: علت تحریک، عامل انتقال، چاشنی، ماده منفجره یا خرج اصلی.

چاشنی: از مواد منفجره اولیه‌ای که حساس‌تر هستند ساخته شده‌اند و وظیفه آنها تحریک خرج اصلی جهت انفجار است. در ساخت آنها معمولاً از فلومینات جیوه و کلرات پتاسیم و... استفاده می‌شود.

خرج اصلی: از مواد منفجره ثانویه ساخته شده است و باید دارای سرعت و قدرت انفجار کافی برای شکستن و جابه‌جایی سنگ باشد.

این دو ماده منفجره (چاشنی و خرج اصلی) هر یک از دو یا چند ماده منفجره یا ترکیب با برخی مواد دیگر ساخته شده‌اند و به تنهایی به عنوان ماده منفجره اصلی یا صنعتی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. این کار برای افزایش کارایی، کاهش هزینه‌ی تمام شده و... است و باعث بروز اصلاحات و تغییراتی در ترکیب و اجزای تشکیل‌دهنده هر یک شده است. ترکیب نهایی را ماده‌ی منفجره‌ی صنعتی که قابل استفاده است، می‌نامند.

در ادامه به برخی از مهم‌ترین و پرکاربردترین مواد منفجره پایه که در ساخت مواد منفجره صنعتی از آنها استفاده می‌شود اشاره خواهد شد:

فلومینات جیوه ($Hg(CNO_2)$): مخلوط آن با مواد اکسیژن‌دار مانند کلرات پتاسیم با سرعت زیادی منفجر می‌شود و در ابتدا از آن به عنوان چاشنی نیتروگلیسیرین به‌کار گرفته می‌شد. در حال حاضر ازتور سرب و DDNP به جای فلومینات جیوه در موارد صنعتی و نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آزید سرب (ازتور سرب) (PbN_6): دارای سرعت انفجار کمتر از فلومینات جیوه بوده و در اثر شعله منفجر می‌شود و به دلیل پایداری آن، موارد استفاده آن از فلومینات جیوه بیشتر است.

نیترات آمونیوم AN (Ammonium Nitrate): ارزان‌ترین و ایمن‌ترین ماده اکسیژن‌دار است که در ساختمان اغلب مواد منفجره به عنوان اکسیژن‌دهنده استفاده می‌شود و بیشترین کاربرد آن در ساخت ANFO و مواد منفجره ژله‌ای است. دارای حساسیت کمی بوده و به آب حساس می‌باشد و برای انفجار آن باید از چاشنی‌های تقویت‌شده (پرایمر) استفاده کرد. دارای چگالی کم و در نتیجه سرعت و قدرت انفجار کم می‌باشد ولی از طرفی دارای هزینه و قیمت بسیار پایینی است که باعث استفاده از آن در مقیاس صنعتی می‌شود.

نیتروگلیسیرین NG($C_3H_5(NO_3)_3$): در دمای عادی مایع و بی‌رنگ است و اولین بار توسط آلفرد نوبل به عنوان ماده منفجره به‌کار گرفته شده است. یکی از اجزای اصلی تشکیل‌دهنده مواد منفجره صنعتی است که دارای مصارف دارویی نیز هست. از ویژگی‌های آن حساسیت بسیار زیاد و برابر با فلومینات جیوه است که با افزایش دما این حساسیت بیشتر نیز می‌گردد. در صورت ایجاد شرایط مناسب دارای سرعت انفجار $8500\frac{m}{s}$ و دارای تعادل اکسیژن مثبت است.

تری نیترو تلوئن (TNT) ($C_7H_5N_3O_6$) (Trinitrotluene): یکی از خواص عمده آن پایداری زیاد آن است. هم‌چنین دارای نام‌های تریتول، ترتیون و... است. چگالی ۱/۵۶ دارد و در تعیین قدرت مواد منفجره از آن به عنوان مبنا استفاده می‌شود. این ماده از اجزای تشکیل‌دهنده بسیاری از مواد منفجره است و حتی از آن مواد دیگری که از TNT نیز قوی‌تر می‌باشند، ساخته شده است. این ماده سمی است و در هنگام کار با آن باید احتیاط‌های لازم را انجام داد.

مثال۷: کدام‌یک از گزینه‌های زیر از عوامل استفاده از ترکیبات انفجاری به هنگام ساخت مواد منفجره اصلی صنعتی نیست؟

۱) کاهش هزینه‌های تمام‌شده و افزایش کارایی

۲) وجود نقطه‌ضعف در تمامی مواد منفجره پایه

۳) امکان استفاده از مواد منفجره در تمامی شرایط

۴) جلوگیری از به‌کارگیری ماده مضری مانند تریتون در ترکیب مواد منفجره

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» هیچ‌یک از مواد منفجره اصلی یا پایه قابلیت به‌تنهایی مورد استفاده قرار گرفتن را ندارند. همواره برای اینکه برحسب شرایط، ماده منفجره در هر شرایطی استفاده شود باید از ترکیب دو یا چند ماده منفجره دارای ویژگی‌های تکمیل‌کننده و ترکیب‌های دیگر استفاده شود که این کار باعث کاهش هزینه‌های تمام‌شده در تمامی مراحل چالزنی و انفجار و افزایش راندمان خواهد شد.

مواد منفجره صنعتی (Blasting explosive): هیچ‌یک از مواد منفجره اصلی برای اجرای کارهای معدنی و عمرانی مناسب نیستند. همواره بسته به شرایط آب و هوایی موجود در محل، وضعیت فیزیکی و مکانیکی سنگ، هدف از انفجار، کنترل و خردکردن، پرتاب سنگ و لرزش زمین، قطر چال‌های حفر شده و... ماده منفجره خاصی نیاز است که از اختلاط دو یا چند ماده منفجره پایه با نسبت‌های مختلف تشکیل می‌شود تا برای استفاده در یک شرایط و هدف خاص مناسب باشند. در این بین مواد منفجره‌ای که بر اساس آمونیوم نیترات ساخته می‌شود دارای ایمنی زیادی هستند. در ساخت این مواد هم‌چنین از مواد دیگری هم استفاده می‌گردد تا تغییراتی در ویژگی‌های ماده منفجره ایجاد نماید و آنها را برای شرایطی خاص مناسب‌تر گرداند. جهت بررسی این مواد آنها را به سه دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌کنند:

۱ـ مواد منفجره دانه‌ای (پودری) مانند آمونیوم نیترات ۲ـ مواد منفجره ژله‌ای (Slurry) ۳ـ دینامیت‌ها (Dynamite)

۱ـ مواد منفجره پودری: مواد منفجره‌ای هستند که به چاشنی حساس نبوده و در ترکیبات آنها آب وجود ندارد. پرکاربردترین ماده برای ساخت مواد منفجره پودری، آمونیوم نیترات است که در ترکیب اکثر مواد منفجره پودری یافت می‌شود و پرکاربردترین و مهم‌ترین ماده منفجره پودری آنفو ANFO می‌باشد.

آنفو ANFO (Ammonium Nitrate Fueloil): این ماده مخلوط آمونیوم نیترات و سوخت مایع است که به علت ایمنی و ارزانی زیاد به مقدار وسیعی در کارهای روباز و زیرزمینی دنیا استفاده می‌شود و به طور کلی شامل ۵ / ۹۴% نیترات آمونیوم و ۵ / ۵% سوخت مایع می‌باشد و چون دارای حساسیت پایین می‌باشد معمولاً با تقویت‌کننده‌ای مانند ژلاتین انفجاری و... منفجر می‌گردد. سرعت انفجار آنفو با ازدیاد قطر چال یا خرج اضافه می‌شود و به حداکثر $۴۳۰۰ \frac{m}{s}$ می‌رسد که این در قطر ۱۳ سانتی‌متر است. همچنین محصورشدگی نیز باعث افزایش سرعت انفجار آن می‌گردد. بیشترین انرژی از انفجار آنفو زمانی بدست می‌آید که میزان سوخت به ۵ / ۵% برسد.

نکته۱۱: اضافه کردن تا تقریباً ۱۵% آمونیوم (AL) به آنفو سبب ازیاد قدرت آنفو و از طرفی باعث کاهش سرعت آن می‌گردد.

مثال۸: کدام گزینه در مورد استفاده از آنفو برای آتشباری حفریات زیرزمینی بزرگ‌مقطع در سنگ‌های سخت نادرست است؟

۱) استفاده از آنفو برای آتشباری در کارهای تونلی به دلیل تولید گازهای سمی اکسیدهای ازت به طور کلی ممنوع است.

۲) از آنفو در حالتی که سطح مقطع تونل به دو بخش تحتانی و فوقانی تقسیم‌بندی می‌شود به ویژه برای خرج‌گذاری چال‌های بخش تحتانی تونل که عموماً به صورت قائم حفر می‌شوند، استفاده می‌شود.

۳) با توجه به قطر بحرانی نسبتاً زیاد آنفو باید توجه داشت که برای خرج‌گذاری آنفو در چال‌های تونلی به چال‌هایی با قطر بیشتر از آن‌چه برای خرج‌گذاری توسط دینامیت لازم است، نیاز داریم.

۴) خرج‌گذاری آنفو در چال‌های افقی با استفاده از سیستم‌های پنوماتیکی امکان‌پذیر است. بنابراین حتی در چال‌های تونلی افقی، در صورتی که از نظر قطر مناسب باشند می‌توان با آنفو خرج‌گذاری و آتشباری نمود.

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» استفاده از آنفو برای آتشکاری در کارهای تونلی ممنوع نیست، ولی به دلایل دیگری مانند حساسیت آن به آب و قطر بحرانی بالا از آن استفاده نمی‌شود.

مثال۹: کدام‌یک از گزینه‌های زیر در رابطه با مواد منفجره پایه‌ای مانند (AN)، (NG) و (TNT) نادرست است؟

۱) TNT سمی است و از آن به عنوان مبنا در تعیین قدرت مواد منفجره استفاده می‌شود.

۲) NG دارای تعادل اکسیژن مثبت و حساسیتی برابر با فلومینات جیوه می‌باشد.

۳) TNT برای اولین‌بار توسط آلفرد نوبل ساخته شده و دارای مصارف دارویی می‌باشد.

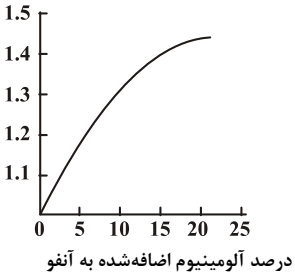
۴) AN دارای چگالی و قیمت پایینی است و بیشترین کاربرد آن در ساخت ANFO است.

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» نیتروگلیسرین برای اولین‌بار توسط آلفرد نوبل ساخته شده و دارای مصارف دارویی نیز می‌باشد. TNT دارای پایداری زیادی بوده و همچنین با نام‌هایی مانند تریتول، تریتون و ... شناخته می‌شود.

تأثیر مقدار سوخت به این صورت است که در صورت کم و زیاد شدن سوخت راندمان انفجار از حالت ایده‌آل پایین‌تر خواهد آمد. به این صورت که هر چه درصد سوخت از میزان مورد نیاز که تقریباً ۶ / ۵% است بیشتر شود، حساسیت آنفو به انفجار کاهش می‌یابد. هر چه میزان آب در آنفو بیشتر شود، چگالی آن و سرعت انفجار افزایش می‌یابد ولی حساسیت آن کاهش پیدا خواهد کرد. در چگالی بالای ۱/۲ آنفو حساسیت خود را از دست داده و به ماده خنثی تبدیل می‌گردد.

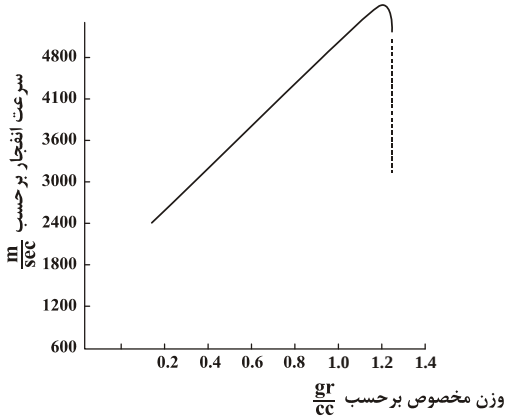
نکته۱۲: برای خرج‌های فله‌ای مانند آنفو هر چه قطر خرج بیشتر شود سرعت انفجار (VOD) افزایش می‌یابد.

مخلوط آلومینیوم و آنفو (ALANFO): نظر به چگالی پایین آنفو، انرژی حاصله از هر متر خرج آن نیز پایین است، برای افزایش این انرژی موادی مانند Al به آن اضافه می‌شود که نه تنها نتایج فنی و اقتصادی خوبی دارد، بلکه باعث عملکرد بهتر آن در سنگ‌های سخت و محکم و سنگ‌های با هزینه حفاری بالا می‌شود. حد عملی مقدار Al اضافه شده براساس انرژی تولیدی و مسائل اقتصادی در حدود ۱۲% تا ۱۳% می‌باشد و مقادیر بیشتر باعث کاهش راندمان انفجار خواهد شد. همچنین Al اضافه‌شده باید این خاصیت را داشته باشد که ۱۰۰% ذرات آن بین ۲۰ تا ۱۵۰ مش بوده و دارای درصد خلوص ۹۴% به بالا باشند. در شکل زیر تغییرات انرژی حاصله از ALANFO با درصد آلومینیوم نشان داده شده است.



منحنی قدرت نسبی آنفوی آلومینیم‌دار به آنفوی معمولی

نیترات آلومینیوم سنگین: فضای خالی بین دانه‌های آمونیوم نیترات به ۳۰ تا ۴۰ درصد می‌رسد که باعث کاهش چگالی آن می‌شود و برای رفع این مشکل از دانه‌هایی با ابعاد متفاوت استفاده می‌شود. با این کار فضای خالی بین دانه‌ها کم خواهد شد و این حالت تا جایی که چگالی آنفو به ۱/۲۵ برسد ادامه خواهد داشت و پس از آن سرعت انفجار به سرعت کاهش می‌یابد.



منحنی تغییرات سرعت انفجار برحسب وزن مخصوص آنفو

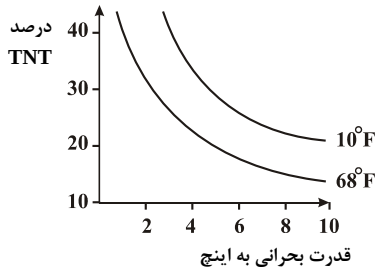
نکته۱۳: جهت انفجار آمونیوم نیترات (سوخت ترکیبی آن) از ترکیبات دیگری هم مانند گوگرد، کربن، نیترومتان و... استفاده می‌شود که هر کدام به یک دلیل خاص استفاده از آنها را همراه با آمونیوم نیترات مشکل‌ساز می‌کند.

مثال۱۰: کدام‌یک از گزینه‌های زیر علت افزایش Al به ترکیب ANFO است؟

۱) باعث افزایش قدرت آنفو خواهد شد.
۲) باعث افزایش سرعت انفجار آنفو خواهد شد.
۳) باعث افزایش حساسیت آنفو خواهد شد.
۴) باعث کاهش فضای خالی بین دانه‌های آمونیوم نیترات خواهد شد.

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» افزایش آلومینیوم به میزان ۱۲ الی ۱۳ درصد باعث افزایش قدرت انفجار آنفو و درصدهای بیشتر باعث کاهش راندمان انفجار خواهد شد.

۲ـ مواد منفجره ژله‌ای (slurry): بزرگ‌ترین مشکل آنفو عدم مقاومت در برابر آب، وزن مخصوص کم، قدرت نسبی کم و قطر بحرانی زیاد است که برای جبران این نقایص مواد منفجره ژله‌ای ساخته شد و اساس آنها محصول اشباع آمونیوم نیترات به همراه اکسیدهای دیگری هم‌چون نیترات سدیم و کلسیم، ذرات سوخت، حساس‌کننده‌ها، ژل‌سازها و پیونددهنده‌ها جهت جلوگیری از تفکیک ذرات است. این مواد در محیط‌های مرطوب قابل استفاده هستند و به دو دسته اصلی ژله‌ای و امولسیون تقسیم می‌شوند. در این مواد از TNT به‌عنوان حساس‌کننده استفاده می‌شود که این مقدار بسته به قطر بحرانی و درجه حرارت محیط کار تغییر می‌کند. در شکل زیر ارتباط قطر بحرانی و درصد TNT در دو درجه حرارت مختلف مشاهده می‌شود.



رابطه بین قطر بحرانی و درصد TNT

۳ـ مواد منفجره امولسیون (Emulsion): این مواد جدیداً وارد بازار شده‌اند و در عین حالی که مزایای مواد منفجره ژله‌ای را دارند از لحاظ قدرت و مقاومت در برابر آب نیز نسبت به آنها بهتر عمل می‌کنند. ترکیب اصلی آنها از یک اکسیدکننده همراه با یک سوخت مصرفی است که معدنی می‌باشد. اکثراً ترکیب شیمیایی آنها شامل نیترات آمونیوم به‌علاوه گازوئیل است. این مواد به صورت مایع، جامد و کِرمِ ساخته می‌شوند.

مزایا:

در درجه حرارت‌های $+۳۲^{\circ}C$ تا $-۷^{\circ}C$ خواص خود را حفظ می‌کند، پایداری آنها در مرور زمان از بقیه مواد منفجره صنعتی بیشتر است. بازده‌ی انفجار آنها بیشتر از باقی مواد است. به ضربه کمتر حساس هستند و دارای سرعت انفجار زیادی می‌باشند. همچنین به دلیل سرعت انفجار زیاد دارای موج ضربه زیادی نیز می‌باشند و در نتیجه از آنها برای ساخت پرایمر و بوستر جهت به‌کارگیری در انفجار در سنگ‌های سخت استفاده می‌شود. برای چال‌های آبدار مناسب می‌باشند و چون در محل تولید می‌شوند، ایمن هستند. همچنین امکان خرج‌گذاری مکانیزه را نیز دارا هستند.

معایب:

۱) شرایط سخت تولید ۲) خراب شدن در دماهای پایین ۳) امکان آلودگی به هنگام خرج‌گذاری و ۴) زمان انبارکردن و حمل و نقل آن طولانی است.

مثال۱۱: کدام گزینه از مزایای مواد منفجره امولسیونی است؟

۱) وزن مخصوص کم و قطر بحرانی زیاد
۲) امکان استفاده در محیط‌های آبدار و حساسیت کم‌تر به ضربه
۳) جهت افزایش سرعت انفجار به این مواد Al اضافه می‌شود.
۴) پایداری در دماهای پایین

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» مواد منفجره امولسیونی به علت وجود TNT در آن‌ها قطر بحرانی کم و چگالی بالاتری نسبت به انفو دارند و جهت افزایش قدرت انفجار به آن‌ها Al اضافه می‌شود و از معایب آن عدم مقاومت در دماهای پایین است.

تأثیر آب بر روی مواد منفجره امولسیون: هرچه مقدار آب بیشتر باشد راندمان انرژی ماده منفجره کاهش می‌یابد، بنابراین هرچه از آب کم‌تری استفاده شود، مناسب‌تر است و برای جبران کاهش انرژی، مقداری Al به آن اضافه می‌شود. در این‌گونه مواد، انفجار از حباب‌های موجود در محلول شروع می‌شود و اگر این حباب‌ها به روش‌های مختلفی مانند فشردن و... خارج شوند حساسیت ماده منفجره ژله‌ای افت پیدا می‌کند.

نکته۱۴: هرچه درجه حرارت محیط کمتر باشد، قطر بحرانی بیشتر می‌گردد و با ازدیاد درجه حرارت به سرعت انفجار افزوده می‌گردد و قطر بحرانی کاهش می‌یابد.

نکته۱۵: سرعت انفجار مواد امولسیونی بیشتر از مواد ژله‌ای است و شاید بهترین مزیت آن استفاده راحت در مناطق آبدار می‌باشد.

نکته۱۶: سرعت‌های انفجاری بالا به ترتیب برای امولسیون بدون Al، امولسیون با Al و سپس مواد ژله‌ای می‌باشند.

مثال۱۲: کدام گزینه در مورد قطر بحرانی یک ماده منفجره استوانه‌ای شکل صحیح است؟

۱) حداقل قطری که در آن سوختن (انفجار) ماده منفجره انجام می‌شود.
۲) حداکثر قطری که در آن سوختن (انفجار) ماده‌ی منفجره انجام می‌شود.
۳) حداکثر قطری است که در آن فشار حاصله از انفجار ماده منفجره ماکزیمم است.
۴) حداقل قطری است که در آن فشار حاصله از انفجار ماده منفجره ماکزیمم است.

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» برای هر ماده منفجره یک قطر حداقل وجود دارد که در قطر کمتر از آن، ماده منفجر نخواهد شد و این قطر را قطر بحرانی می‌نامند.